

ISSN 1561-8331 (Print)
 ISSN 2524-2342 (Online)
 УДК 539.23+681.586.7
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-81-88>

Поступила в редакцию 07.04.2023
 Received 07.04.2023

Д. В. Сапсалёв^{1,2}, Г. Б. Мельникова¹, А. В. Аксютыц³, Т. Н. Толстая¹,
 Д. А. Котов³, С. А. Чижик¹

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
 Минск, Беларусь

²Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

СЕНСОРНЫЕ СЛОИ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ

Аннотация. Представлены результаты применения покрытий полиметилметакрилата для разработки емкостных датчиков анализа содержания тяжелых металлов в воде (на примере ионов Ni^{2+}). Методом атомно-силовой микроскопии исследованы структурно-морфологические характеристики сформированного проводящего никелевого слоя и наноструктурированных пленок полиметилметакрилата. На основании анализа зависимости емкостных характеристик исходного сенсора от частоты при различной концентрации ионов Ni^{2+} установлены рабочие характеристики датчика: время отклика – 5 мин; рабочий диапазон концентраций ионов Ni^{2+} : $1 \cdot 10^{-3}$ –50 мМ; нижний предел обнаружения $\approx 0,06$ мг/л. Показано, что формирование на проводящем слое никеля покрытия полиметилметакрилата методом спин-коутинга увеличивает срок службы сенсора до восьми циклов с сохранением уровня чувствительности датчика.

Ключевые слова: емкостные датчики, полиметилметакрилат, атомно-силовая микроскопия, спин-коутинг, анализ качества воды

Для цитирования. Сенсорные слои полиметилметакрилата для емкостных датчиков анализа содержания катионов тяжелых металлов в воде / Д. В. Сапсалёв [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2024. – Т. 60, № 1. – С. 81–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-81-88>

D. V. Sapsaliou^{1,2}, G. B. Melnikova¹, A. V. Aksiuchyts³, T. N. Tolstaya¹, D. A. Kotov³, S. A. Chizhik¹

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus

²Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, Minsk, Belarus

³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

SENSORY LAYERS OF POLY(METHYL METHACRYLATE) FOR CAPACITIVE SENSORS FOR ANALYSIS OF THE CONTENT OF HEAVY METAL CATIONS IN WATER

Abstract. The results of using poly(methyl methacrylate) coatings for the development of the capacitive sensors for analyzing the content of heavy metals in water (using Ni^{2+} ions as example) are presented. Structural and morphological characteristics of the formed conductive nickel layer and nanostructured poly(methyl methacrylate) films were studied by atomic force microscopy. Based on the analysis of the dependence of the capacitive characteristics of the original sensor on the frequency at different concentrations of Ni^{2+} ions, the following operating characteristics of the sensor were established: response time – 5 min; operating range of Ni^{2+} ion concentrations: $1 \cdot 10^{-3}$ –50 mM; lower detection limit $\approx 0,06$ mg/l. It is shown that the formation of a poly(methyl methacrylate) coating on a conductive nickel layer by the spin coating method increases the service life of the sensor to eight cycles while maintaining the level of sensor sensitivity.

Keywords: capacitive sensors, poly(methyl methacrylate), atomic force microscopy, spin coating, water quality analysis

For citation. Sapsaliou D. V., Melnikova G. B., Aksiuchyts A. V., Tolstaya T. N., Kotov D. A., Chizhik S. A. Sensory layers of poly(methyl methacrylate) for capacitive sensors for analysis of the content of heavy metal cations in water. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 1, pp. 81–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-1-81-88>

Введение. Емкостные датчики широко применяют для решения ряда практических задач промышленности, медицины и экологии. К достоинствам емкостных датчиков следует отнести высокое разрешение, низкое энергопотребление, простоту и удобство в эксплуатации [1–6]. В литературе наиболее широко представлены емкостные датчики влажности, температуры, давления, уровня жидкости и др. [1, 2].

Данные о применении емкостных сенсорных систем для количественного анализа содержания химических веществ не столь многочисленны. Тем не менее в научных работах подтверждается, что регистрация зависимости различных электрофизических характеристик сенсорных слоев (емкость, сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь и т. д.) от концентрации того или иного аналита – перспективный метод оценки его содержания в пробе [3–9]. Емкостные сенсоры, как правило, используют для количественного определения газов, например водорода [10] и аммиака [5]; pH [11]; содержания ионов тяжелых металлов в воде и почве [8, 9].

Несмотря на достижения в области создания химических емкостных сенсоров, актуальной проблемой остается конструирование датчиков с улучшенными показателями чувствительности, селективности и т. д. Одним из путей разработки таких систем является применение в качестве сенсорного слоя полимеров и нанокompозитов на их основе [12]. Модификация емкостных датчиков полимерными покрытиями обеспечивает увеличение чувствительности к газам и парам летучих органических веществ, а также долговременную стабильность сенсоров [12, 13]. Использование полимерных покрытий и их нанокompозитов также существенно расширяет области применения электрохимических сенсоров. Такие датчики могут быть использованы в мониторинге окружающей среды для анализа содержания пестицидов [3], антибиотиков [6], ионов тяжелых металлов в воде [14, 15]. Например, электроактивный композит полианилин/углеродные нанотрубки успешно применяется для обнаружения ионов Ni^{2+} . Для повышения селективности датчика в состав нанокompозита дополнительно вводили диметилглиоксим в качестве хелатирующего агента [14]. Модификация золотых электродов полифосфиновыми полимерами позволила разработать импедиметрические датчики для обнаружения ионов Pb^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} и Ni^{2+} [15]. Лучшие рабочие параметры показаны для датчика ионов Pb^{2+} : предел обнаружения ионов – 10^{-10} г/л; линейный диапазон – 10^{-10} – 10^{-3} г/л. Обратимость работы сенсора достигали промыванием в растворе этилендиамина тетрауксусной кислоты.

Поскольку емкостные датчики функционируют на принципе конденсатора, то их работа зависит от факторов, влияющих на диэлектрическую проницаемость. К ним относятся: тип используемых материалов, конфигурация и площадь электродов, концентрация веществ в анализируемой пробе, полярность используемого растворителя, температура, влажность и давление [1, 16]. Подбор толщины используемого полимерного покрытия является важной задачей при разработке емкостных сенсорных систем. С одной стороны, более предпочтительным представляется применение тонкопленочных покрытий: тонкий слой обеспечивает связывание аналита вблизи преобразователя, что приводит к увеличению чувствительности [6]. С другой стороны, рост значений шероховатости поверхности при увеличении толщины покрытий обеспечивает лучшую сорбцию аналита, следовательно, и улучшение эксплуатационных характеристик датчика. Так, авторы в работе [17] сообщают об увеличении чувствительности датчика по отношению к NaCl с возрастанием количества слоев поли(о-этоксанилина) и сульфированного полистирола.

Таким образом, применение полимерных покрытий актуально при разработке емкостных сенсорных систем, предназначенных для количественной оценки содержания химических веществ в различных объектах окружающей среды; оптимизация толщины полимерного слоя является важным этапом разработки емкостных датчиков с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Цель работы – получение сенсорных слоев на основе полиметилметакрилата (ПММА) для емкостных датчиков анализа содержания ионов тяжелых металлов в воде (на примере Ni^{2+}).

Материалы и методы. В работе использован емкостный датчик встречно-штыревого типа, представляющий собой проводящий слой никеля с заданной топологией, сформированный методом ионно-лучевого распыления (установка ВУ-1БСп, СССР) на ситалловой подложке (рис. 1).

Перед напылением металлического слоя проводили атомарную очистку поверхности подложек плазмой диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении (система генерации плазмы при атмосферном давлении, ЦМИ НИЧ БГУИР, Республика Беларусь). Для формирования рисунка токопроводящего слоя заданной топологии на подложку предварительно закреплялась маска (расстояние от мишени никеля – 200 мм). Толщина сформированных никелевых покрытий составила 100 ± 10 нм (микροинтерферометр МИИ-4, СССР).

Одно- и многослойные покрытия ПММА (Sigma-Aldrich, $M_r \approx 10\,000$) формировали на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин (ориентация 111, линейные размеры $1,5 \times 1,5$ см) и никелевых слоев методом спин-коутинга из его раствора в хлороформе ($c = 1$ мг/мл). Аликвоту раствора полимера прикапывали на подложку, вращающуюся со скоростью 3 200 оборотов в минуту. Вращение не прекращали в течение минуты (после формирования каждого слоя) для удаления остаточных количеств растворителя.

Исследование структуры поверхности сформированных покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием кремниевых кантилеверов FMG 01 (TipsNano, Российская Федерация). Гидрофильные свойства поверхности сформированных покрытий оценивали на основании измерения краевого угла смачивания (КУС) на установке DSA 100E (Küss, Германия); рабочая жидкость – дистиллированная вода; объем капли – 2 мкл. КУС определяли методом лежащей капли (построение касательной в трехфазной точке: жидкость – подложка – воздух).

Рабочие характеристики датчика определяли на основании анализа зависимости емкости от частоты (измеритель иммитанса E7-25, Республика Беларусь) при выдерживании в растворах сульфата никеля (II) с различной концентрацией ($1 \cdot 10^{-4}$ –50 мМ). Выбор ионов Ni^{2+} в качестве аналита обусловлен их хорошей адсорбцией на поверхности проводящего слоя никеля (в соответствии с правилом Панета – Фаянса). Рабочие растворы готовили из $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ квалификации «ч.»; объем анализируемой пробы составлял 60 мл. Для определения стабильности работы сенсоров проводили серию измерений. За один цикл принято измерение емкостных характеристик датчика для растворов со следующими значениями концентраций $NiSO_4$: $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-1}$, 1, 10, 50 мМ. Время выдерживания датчиков в растворах определяли экспериментально по установлению постоянных значений емкости при частоте 1 кГц. Для всех используемых в работе датчиков было выбрано время выдерживания 5 мин.

Результаты и их обсуждение. Анализ данных атомно-силовой микроскопии показал, что поверхность наноструктурированного проводящего покрытия никеля представлена равномерно распределенными зернами продолговатой формы. Максимальный размер отдельных зерен до 450×800 нм (рис. 2).

С целью улучшения эксплуатационных характеристик датчика на рабочей поверхности электродов формировали одно- и многослойные покрытия ПММА методом спин-коутинга.

Показано, что одно- и многослойные покрытия ПММА, сформированные как на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин, так и на поверхности никеля, имеют ячеистую структуру (рис. 3, а–f).

Для всех покрытий ПММА на никеле установлено наличие конгломератов как вытянутой, так и сферической формы, максимальные размеры которых увеличиваются с ростом числа слоев полимерного покрытия, что связано с накоплением дефектов в пленке при нанесении каждого последующего слоя.

Формирование однослойного покрытия ПММА на поверхности никеля приводит к снижению КУС от $96,24$ до $82,63^\circ$. КУС для многослойных полимерных пленок составляет $71,82$ и $72,58^\circ$ для 5 и 10 слоев ПММА. Полученные данные для много-

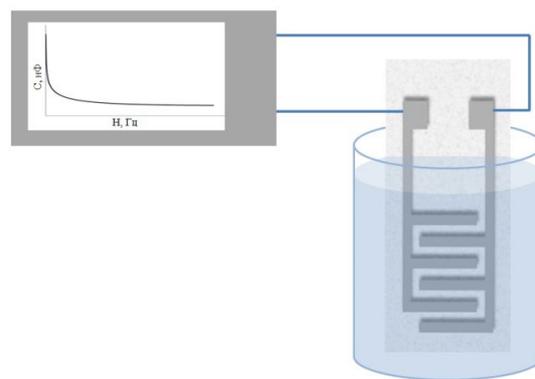


Рис. 1. Схема проведения измерений емкостных характеристик датчика встречно-штыревого типа

Fig. 1. Scheme for measuring the capacitive characteristics of an interdigital sensor

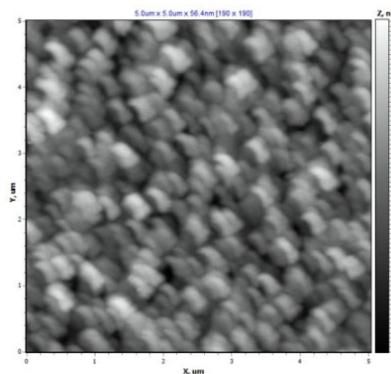


Рис. 2. Данные АСМ о структуре никелевого покрытия, сформированного методом ионно-лучевого распыления

Fig. 2. AFM data on the structure of the nickel coating formed by ion-beam sputtering

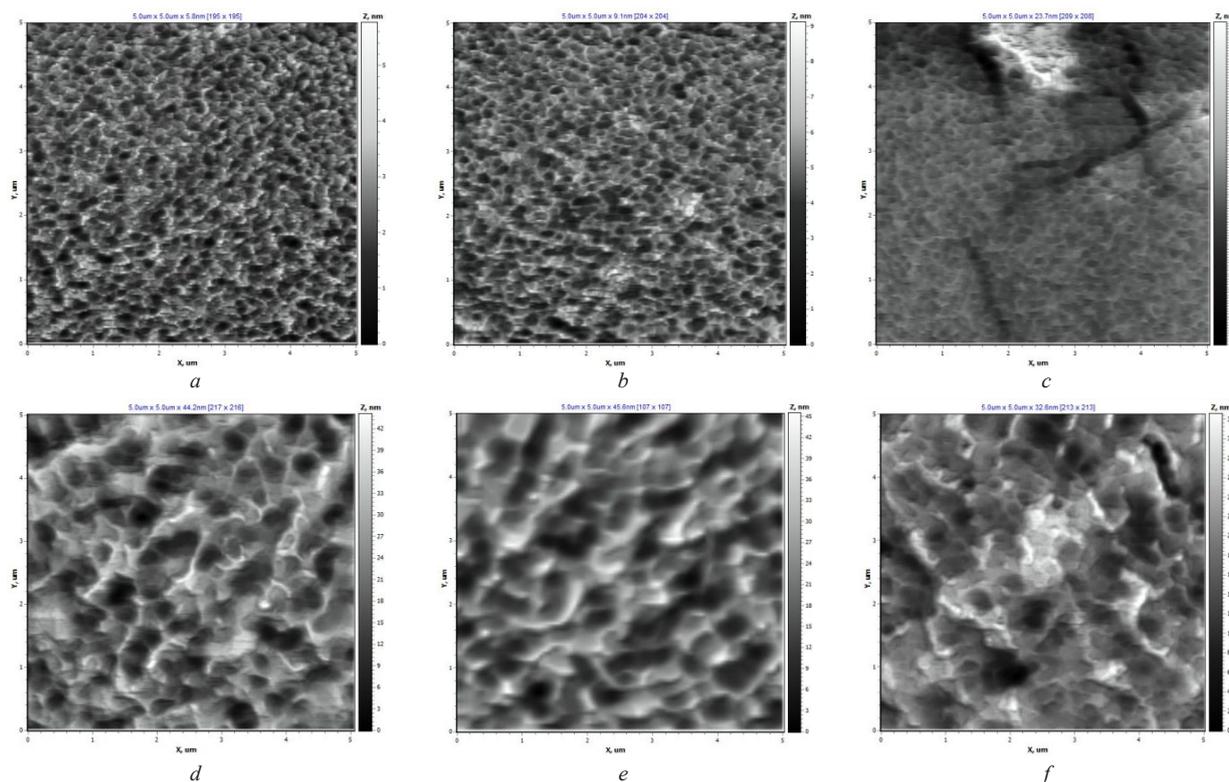


Рис. 3. Структура покрытий ПММА, сформированных на поверхности кремниевых пластин (*a–c*) и никеля (*d–f*) методом спин-коутинга (*a, d* – 1 слой; *b, e* – 5 слоев; *c, f* – 10 слоев)

Fig. 3. Structure of poly(methyl methacrylate) coatings formed on the surfaces of silicon wafers (*a–c*) and nickel (*d–f*) by the spin coating method (*a, d* – 1 layer; *b, e* – 5 layers; *c, f* – 10 layers)

слоистых покрытий ПММА, сформированных на поверхности никеля, согласуются с результатами оценки смачиваемости поверхности ПММА (1 слой) на гидрофилизированных кремниевых подложках ($\text{KUC} = 72,6^\circ$ [18]), что свидетельствует о нивелировании влияния металлического слоя при увеличении числа слоев ПММА.

Зависимости емкостных характеристик исходного (немодифицированного полимерными покрытиями) датчика от частоты, полученные при выдерживании в растворах Ni^{2+} с различной концентрацией, представлены на рис. 4, *a*. Установлено, что значения емкости датчика снижаются с увеличением частоты для всех анализируемых растворов; при увеличении концентрации NiSO_4 емкость датчика возрастает. Сенсор демонстрирует линейный отклик в диапазоне концентраций $1 \cdot 10^{-3}$ –50 мМ (рис. 4, *b*). Линейный характер зависимости наблюдается при небольших значениях частоты (до 300 Гц). В работе приводятся данные зависимости емкостных характеристик датчиков от концентрации ионов Ni^{2+} в логарифмических координатах при 120 Гц. Нижний предел обнаружения ионов Ni^{2+} составляет $\approx 0,06$ мг/л, что позволяет считать разработанный датчик перспективным устройством для анализа качества воды (ПДК никеля в воде – 0,1 мг/л суммарно (СанПиН 10-124 РБ 99)).

Значения емкости сенсора снижаются с каждым последующим циклом, что связано с частичной реструктуризацией проводящего слоя никеля (рис. 5).

На основании данных емкостных характеристик датчиков с сенсорными слоями ПММА показано, что сенсор с однослойным полимерным покрытием демонстрирует отклик, сопоставимый с исходным датчиком (рис. 6, *a*).

Установлено, что модификация поверхности электродов пленкой ПММА значительно повышает срок службы сенсора (емкостные характеристики не изменяются в пределах доверительного интервала в течение восьми циклов измерений). Девятый и десятый циклы характеризуются снижением значений емкости, что обусловлено, как и в случае с исходным датчиком, изменением структуры сенсорного слоя (рис. 6, *b*).

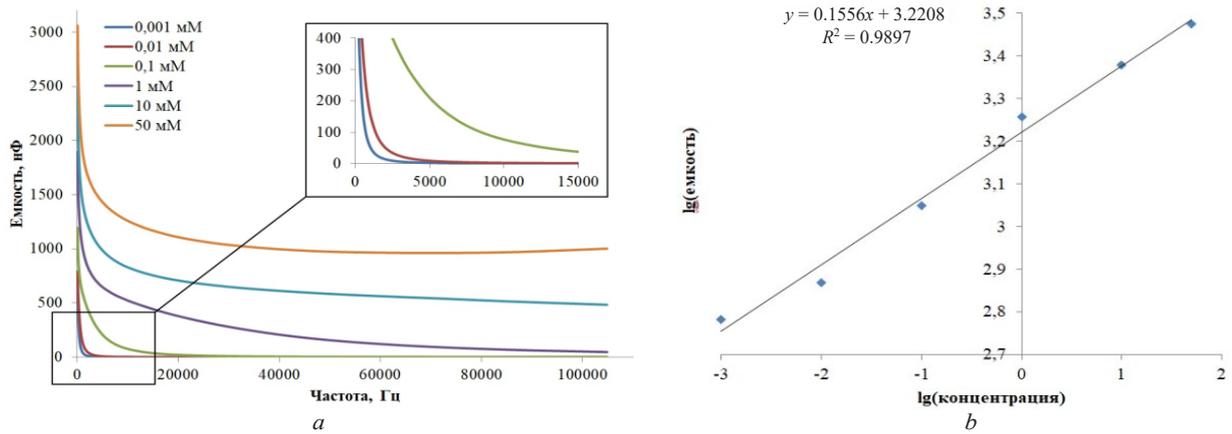


Рис. 4. Зависимости емкости от частоты – (a) и lg(C) от lg(c) при 120 Гц – (b) для исходного датчика при выдерживании в растворах NiSO₄ с различной концентрацией в течение 5 мин (1 цикл)

Fig. 4. Dependences of capacitance on frequency – (a) and lg(C) on lg(c) at 120 Hz – (b) for the original sensor when kept in NiSO₄ solutions with different concentration for 5 min (1 cycle)

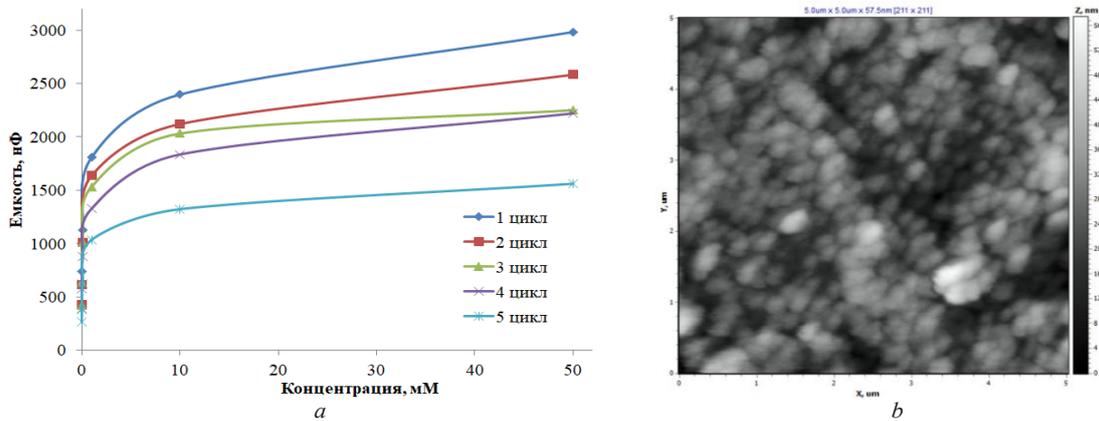


Рис. 5. Зависимости емкости исходного датчика от концентрации ионов Ni²⁺ для пяти циклов измерений при 120 Гц (a) и структура никелевого покрытия после пяти циклов измерений (b)

Fig. 5. Dependences of the capacitance of the original sensor on the concentration of Ni²⁺ ions for five cycles of measurements at 120 Hz (a) and the structure of the nickel coating after five cycles of measurements (b)

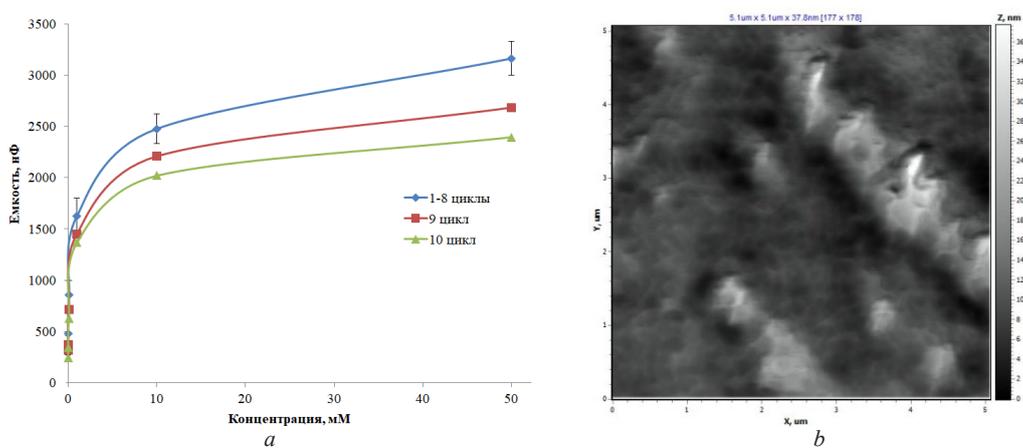


Рис. 6. Зависимости емкости датчика с однослойным покрытием ПММА от концентрации ионов Ni²⁺ для 10 циклов измерений при 120 Гц (a) и структура поверхности полимерного слоя после 10 циклов измерений (b)

Fig. 6. Dependences of the capacitance of a sensor with a single-layer PMMA coating on the concentration of Ni²⁺ ions for 10 cycles of measurements at 120 Hz (a) and the surface structure of the polymer layer after 10 cycles of measurements (b)

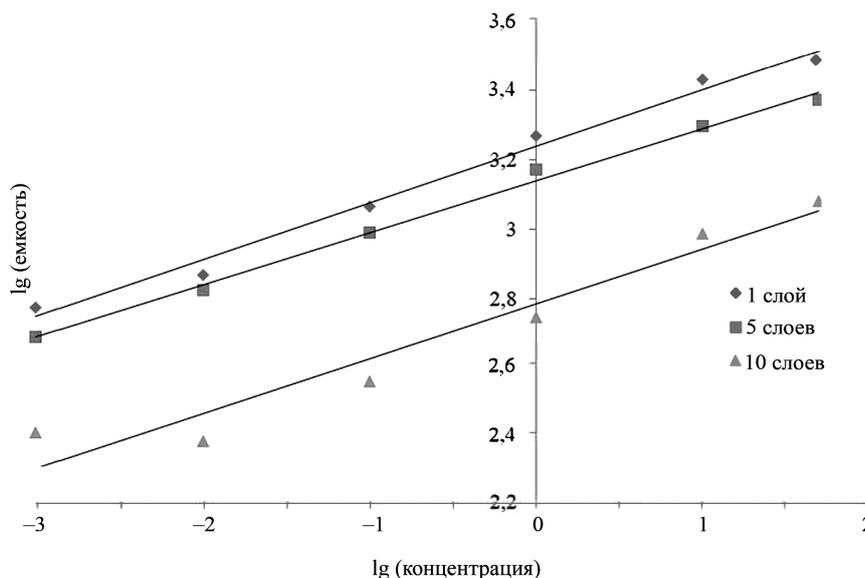


Рис. 7. Зависимость $\lg(C)$ от $\lg(c)$ для датчиков, модифицированных одно- и многослойными покрытиями ПММА при 120 Гц (1 цикл)

Fig. 7. Dependence of $\lg(C)$ on $\lg(c)$ for sensors modified with single- and multi-layers of PMMA coatings at 120 Hz (1 cycle)

Увеличение количества слоев ПММА приводит к снижению чувствительности рассматриваемых сенсорных систем (рис. 7). Отметим, что характер зависимости емкости датчика от концентрации ионов Ni^{2+} в растворах соответствует исходному проводящему покрытию и не зависит от количества слоев ПММА (тангенс угла наклона прямой для всех рассматриваемых сенсоров лежит в диапазоне 0,150–0,164).

Заключение. Разработан емкостный датчик встречно-штыревого типа, представляющий собой токопроводящий слой никеля заданной топологии, сформированный методом ионно-лучевого распыления на поверхности ситалловой подложки, с сенсорным покрытием ПММА, нанесенным методом спин-коутинга.

На основании анализа зависимости емкостных характеристик сенсора от частоты при различной концентрации ионов Ni^{2+} установлены рабочие характеристики датчика: время отклика – 5 мин; рабочий диапазон концентраций ионов Ni^{2+} – $1 \cdot 10^{-3}$ –50 мМ (линейный отклик наблюдается в логарифмических координатах при небольших частотах – до 300 Гц), нижний предел обнаружения $\approx 0,06$ мг/л.

Показано, что формирование на проводящем слое никеля покрытия ПММА методом спин-коутинга увеличивает срок службы сенсора до восьми циклов с сохранением уровня чувствительности датчика. Увеличение количества слоев полимера до пяти и десяти приводит к снижению чувствительности емкостного сенсора.

Таким образом, разработанные сенсорные системы емкостного типа могут найти применение при проведении экспресс-тестов на содержание ионов тяжелых металлов (в частности Ni^{2+}) в воде. Формирование покрытий ПММА на поверхности электродов позволяет значительно повысить срок службы датчика.

Список использованных источников

1. Ferrari, V. Printed thick-film capacitive sensors / V. Ferrari, M. Prudenziati // Printed Films: Materials Science and Applications in Sensors, Electronics and Photonics. – Woodhead Publishing Limited, 2012. – P. 193–220. <https://doi.org/10.1533/9780857096210.2.193>
2. Capacitive sensor system for measurement of temperature and humidity / B. Oertel [et al.] // Fresenius J. Anal. Chem. – 1994. – Vol. 349. – P. 391–393. <https://doi.org/10.1007/BF00326605>
3. Capacitive sensor based on molecularly imprinted polymers for detection of the insecticide imidacloprid in water / S. El-Akaad [et al.] // Sci. Rep. – 2020. – Vol. 10. – P. 14479. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71325-y>

4. Paper-based capacitive sensors for identification and quantification of chemicals at the point of care / J. Hu [et al.] // *Talanta*. – 2017. – Vol. 165. – P. 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.12.086>
5. Bindra, P. Capacitive gas and vapor sensors using nanomaterials / P. Bindra, A. Hazra // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2018. – Vol. 29. – P. 6129–6148. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8606-2>
6. Molecularly Imprinted Polymers for Chemical Sensing: A Tutorial Review / N. Leibl [et al.] // *Chemosensors*. – 2021. – Vol. 9, № 6. – P. 123–141. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9060123>
7. Jin Mei, C. A review on the determination heavy metals ions using calixarene-based electrochemical sensors / C. Jin Mei, S. Ainliah Alang Ahmad // *Arab. J. Chem.* – 2021. – Vol. 14, iss. 9. – P. 103303. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103303>
8. Novel synthetic phytochelatin-based capacitive biosensor for heavy metal ion detection / I. Bontidean [et al.] // *Biosens. and Bioelectron.* – 2003. – Vol. 18, N 5-6. – P. 547–553. [https://doi.org/10.1016/s0956-5663\(03\)00026-5](https://doi.org/10.1016/s0956-5663(03)00026-5)
9. Flexible sensors platform for determination of cadmium concentration in soil samples / M. Radovanović [et al.] // *Comput. Electron. Agr.* – 2019. – Vol. 166. – P. 105001. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105001>
10. Capacitive sensor based on GaN honeycomb nanonetwork for ultrafast and low temperature hydrogen gas detection / H. Yu [et al.] // *Sens. Actuators, B*. – 2021. – Vol. 346. – P. 130488. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130488>
11. Broad-Range Hydrogel-Based pH Sensor with Capacitive Readout Manufactured on a Flexible Substrate / K. Hammarling [et al.] // *Chemosensors*. – 2018. – Vol. 6, № 3. – P. 30. <https://doi.org/10.3390/chemosensors6030030>
12. A dielectric coating for improved performance of capacitive sensors in all-polymer microfluidic devices / C. Offenzerler [et al.] // *Microelectron. Eng.* – 2020. – Vol. 223. – P. 111220. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111220>
13. Igreja, R. Dielectric response of interdigital chemocapacitors: The role of the sensitive layer thickness / R. Igreja, C. J. Dias // *Sens. Actuators, B*. – 2006. – Vol. 115, № 1. – P. 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.08.019>
14. Sensitive detection of heavy metal ions: An electrochemical approach / H. Patil [et al.] // *Int. J. Mod. Phys. B*. – 2018. – Vol. 32, № 19. – P. 1840042. <https://doi.org/10.1142/s0217979218400428>
15. A Sensitive Impedimetric Sensor Based on Biosourced Polyphosphine Films for the Detection of Lead Ions / T. Chabbah [et al.] // *Chemosensors*. – 2020. – Vol. 8, № 2. – P. 34. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8020034>
16. Kholimatussadiyah, S. A portable and low-cost parallel-plate capacitor sensor for alkali and heavy metal ions detection / S. Kholimatussadiyah, T. A. Prijo // *J. Adv. Dielectr.* – 2018. – Vol. 8, № 4. – Art no. 1850026. <https://doi.org/10.1142/s2010135x18500261>
17. Effect of film thickness and different electrode geometries on the performance of chemical sensors made of nanostructured conducting polymer films / N. K. L. Wiziack [et al.] // *Sens. Actuators, B*. – 2007. – Vol. 122, iss. 2. – P. 484–492. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.06.016>
18. Тонкие композиционные пленки полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния / Д. В. Сапалёв [и др.] // *Журн. Белорус. гос. ун-та. Химия*. – 2021. – № 2. – С. 36–49. <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-2-36-49>

References

1. Ferrari V., Prudenziati M. Printed thick-film capacitive sensors. *Printed Films: Materials Science and Applications in Sensors, Electronics and Photonics*, Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 193–220. <https://doi.org/10.1533/9780857096210.2.193>
2. Oertel B., Hiibert Th., Heinze D., Banach U. Capacitive sensor system for measurement of temperature and humidity. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1994, vol. 349, pp. 391–393. <https://doi.org/10.1007/BF00326605>
3. El-Akaad S., Mohamed M. A., Abdelwahab N. S., Abdelaleem E. A., De Saeger S., Beloglazova N. Capacitive sensor based on molecularly imprinted polymers for detection of the insecticide imidacloprid in water. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10. P. 14479. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71325-y>
4. Hu J., Yew C.-H. T., Chen X., Feng S., Yang Q., Wang S., Wee W.-H., Pingguan-Murphy B., Lu T. J., Xu F. Paper-based capacitive sensors for identification and quantification of chemicals at the point of care. *Talanta*, 2017, vol. 165, pp. 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.12.086>
5. Bindra P., Hazra A. Capacitive gas and vapor sensors using nanomaterials. *Journal of Materials Science – Materials in Electronics*, 2018, vol. 29, pp. 6129–6148. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8606-2>
6. Leibl N., Haupt K., Gonzato C., Duma L. Molecularly Imprinted Polymers for Chemical Sensing: A Tutorial Review. *Chemosensors*, 2021, vol. 9, no. 6, pp. 123–141. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9060123>
7. Jin Mei C., Ainliah Alang Ahmad S. A review on the determination heavy metals ions using calixarene-based electrochemical sensors. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021, vol. 14, iss. 9, pp. 103303. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103303>
8. Bontidean I., Ahlqvist J., Mulchandani A., Chen W., Bae W., Mehra R. K., Mortari A., Csöregi E. Novel synthetic phytochelatin-based capacitive biosensor for heavy metal ion detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 2003, vol. 18, no. 5–6, pp. 547–553. [https://doi.org/10.1016/s0956-5663\(03\)00026-5](https://doi.org/10.1016/s0956-5663(03)00026-5)
9. Radovanović M., Vasiljević D., Krstić D., Antić I., Korzhyk O., Stojanović G., Škrbić B. D. Flexible sensors platform for determination of cadmium concentration in soil samples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, vol. 166, pp. 105001. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105001>
10. Yu H., Sun A., Liu Y., Zhou Y., Fan P., Luo J., Zhong A. Capacitive sensor based on GaN honeycomb nanonetwork for ultrafast and low temperature hydrogen gas detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 346, pp. 130488. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130488>
11. Hammarling K., Engholm M., Andersson H., Sandberg M., Nilsson, H.-E. Broad-Range Hydrogel-Based pH Sensor with Capacitive Readout Manufactured on a Flexible Substrate. *Chemosensors*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 30. <https://doi.org/10.3390/chemosensors6030030>

12. Offenzeller C., Hintermüller M. A., Hilber W., Jakoby B. A dielectric coating for improved performance of capacitive sensors in all-polymer microfluidic devices. *Microelectronic Engineering*, 2020, vol. 223, pp. 111220. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111220>

13. Igrēja R., Dias C. J. Dielectric response of interdigital chemocapacitors: The role of the sensitive layer thickness. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, vol. 115, no. 1, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.08.019>

14. Patil H. K., Deshmukh M. A., Bodkhe G. A., Shirsat M. D. Sensitive detection of heavy metal ions: An electrochemical approach. *International Journal of Modern Physics B*, 2018, vol. 32, no. 19, pp. 1840042. <https://doi.org/10.1142/s0217979218400428>

15. Chabbah T., Abderrazak H., Souissi R., Saint-Martin P., Casabianca H., Chatti S., Mercier R., Rassas I., Errachid A., Hammami M., Jaffrezic-Renault N. A Sensitive Impedimetric Sensor Based on Biosourced Polyphosphine Films for the Detection of Lead Ions. *Chemosensors*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 34. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8020034>

16. Kholimatussadiyah S., Prijo T. A. A portable and low-cost parallel-plate capacitor sensor for alkali and heavy metal ions detection. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2018, vol. 8, no. 4, art. no. 1850026. <https://doi.org/10.1142/s2010135x18500261>

17. Wiziack N. K. L., Paterno L. G., Fonseca F. J., Mattoso L. H. C. Effect of film thickness and different electrode geometries on the performance of chemical sensors made of nanostructured conducting polymer films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, vol. 122, iss. 2, pp. 484–492. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.06.016>

18. Sapsaliou D. V., Melnikova G. B., Lapitskaya V. A., Tolstaya T. N., Kuznetsova T. A., Kotov D. A., Chizhik S. A. Thin composite polymethyl methacrylate films with silicon dioxide nanoparticles. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya = Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2021, no. 2, pp. 36–49 (in Russian). <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-2-36-49>

Информация об авторах

Сапсальёв Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). Аспирант. Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка (ул. Советская, 18, 220030, Минск, Беларусь). E-mail: dsapsalev@list.ru

Мельникова Галина Борисовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). E-mail: galachkax@gmail.com

Аксиуцц Александр Владимирович – аспирант, младший научный сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь). E-mail: a.aksiuchyts@bsuir.by

Толстая Татьяна Николаевна – научный сотрудник. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru

Котов Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь). E-mail: kotov@bsuir.by

Чижик Сергей Антонович – академик, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). E-mail: chizhik_sa@tut.by

Information about the authors

Sapsaliou Dmitry V. – Junior researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). Postgraduate Student. Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank (18, Savietskaja Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dsapsalev@list.ru

Melnikova Galina B. – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galachkax@gmail.com

Aksiuchyts Aliaksandr V. – Postgraduate student, Junior researcher. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.aksiuchyts@bsuir.by

Tolstaya Tatyana N. – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru

Kotov Dmitry A. – Ph. D (Engineering), Associate Professor. Associate Professor of the Department. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kotov@bsuir.by

Chizhik Sergei A. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chizhik_sa@tut.by